

Cemaran Logam Berat pada Kerang Darah (*Anadara granosa*) dari Perairan Babulu Laut Penajam Paser Utara dan Risiko Terhadap Kesehatan Manusia

Erian Febri Satriawan¹, Marsanda Marsanda¹, Muhammad Ikhsan Saputra¹,
Mohammad Sumiran Papatungan¹, Irma Suryana¹, Irwan Ramadhan Ritonga^{1,2*}

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman
Jl.Gunung Tabur No 1, Kampus Gunung Kelua Samarinda, Kalimantan Timur, 75119 Indonesia

²Laboratory of Oceanography and Engineering, Integrated Laboratory, Universitas Mulawarman
Long Apari Street, Kampus Gunung Kelua Samarinda, East Kalimantan , 75119 Indonesia

Email: ritonga_irwan@fpik.unmul.ac.id

Abstrak

Perairan Babulu Laut yang terletak di Kabupaten Penajam Paser Utara dikenal sebagai salah satu sentra produksi kerang darah (*Anadara granosa*) di Kalimantan Timur. Wilayah perairan tersebut memiliki potensi risiko paparan logam berat yang dapat terakumulasi pada jaringan biota laut, sehingga berimplikasi terhadap timbulnya gangguan kesehatan pada masyarakat yang mengonsumsinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan logam berat arsen (As), tembaga (Cu), besi (Fe), mangan (Mn), dan seng (Zn) pada *A. granosa* serta menilai potensi risiko kesehatan akibat konsumsinya. Penelitian dilaksanakan pada Desember 2024 hingga April 2025 di perairan Babulu Laut Penajam Paser Utara. Analisis kandungan logam berat dilakukan menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil penelitian menunjukkan kandungan As sebesar 0,003–0,973 mg/kg, Cu 0,064–0,133 mg/kg, Fe 2,357–4,519 mg/kg, Mn 0,102–0,205 mg/kg, dan Zn 0,736–0,991 mg/kg. Konsentrasi As, Cu, Mn, dan Zn masih berada di bawah baku mutu berdasarkan beberapa referensi, sedangkan Fe telah melampaui baku mutu yang ditetapkan oleh BPOM (2009). Nilai *Estimated Daily Intake* (EDI) logam As melebihi *Reference Dose* (RfD), sedangkan logam lainnya masih berada di bawah nilai RfD sehingga diduga berpotensi menimbulkan efek penyakit. Nilai *Tolerable Hazard Quotient* (THQ) dan *Hazard Index* (HI) <1 menunjukkan tidak adanya risiko non-karsinogenik. Namun, nilai *Cancer Risk* (CR) logam As >1×10⁻⁴ mengindikasikan potensi risiko karsinogenik akibat konsumsi *A. granosa* dari perairan Babulu Laut Penajam Paser Utara. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan lingkungan pesisir terpadu dan pengawasan keamanan pangan laut, mengingat potensi risiko karsinogenik arsen (As) dari konsumsi jangka panjang *A. granosa*, terutama pada kelompok anak-anak.

Kata kunci: *Anadara granosa*, Logam Berat, Risiko, Non-karsinogenik, Karsinogenik

Abstract

Heavy Metal Contamination in Blood Clams (Anadara granosa) from Babulu Waters, North Penajam Paser Sea and Risks to Human Health

The coastal waters of Babulu Laut, located in Penajam Paser Utara Regency, are recognized as one of the primary production centers for blood cockles (*Anadara granosa*) in East Kalimantan. These waters are potentially at risk of heavy metal exposure, which might accumulate in the tissues of aquatic biota, thereby posing health implications for the communities that consume them. This study aimed to determine the concentrations of arsenic (As), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn) in *A. granosa* and to assess the potential health risks associated with its consumption. The study was conducted from December 2024 to April 2025 in the Babulu Laut waters, North Penajam Paser Regency. Heavy metal concentrations were analyzed using *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). The results showed that As concentrations ranged from 0.003 to 0.973 mg/kg, Cu from 0.064 to 0.133 mg/kg, Fe from 2.357 to 4.519 mg/kg, Mn from 0.102 to 0.205 mg/kg, and Zn from 0.736 to 0.991 mg/kg. The concentrations of As, Cu, Mn, and Zn were below the permissible limits based on several references, while Fe exceeded the quality standard established by BPOM (2009). The *Estimated Daily Intake* (EDI) of As exceeded the *Reference Dose* (RfD), whereas the EDI

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v15i2.82217

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 04-02-2026

Disetujui/Accepted : 23-04-2026

values of the other metals remained below their respective RfD limits. The Total Hazard Quotient (THQ) and Hazard Index (HI) values were <1 , indicating no significant non-carcinogenic health risk. However, the Cancer Risk (CR) value for As exceeded 1×10^{-4} , indicating a potential carcinogenic risk associated with long-term consumption of *A. granosa* from the Babulu Laut waters. Therefore, integrated coastal environmental management and seafood safety surveillance are required, considering the potential carcinogenic risk of arsenic (As) from long-term consumption of *A. granosa*, particularly among children.

Keywords: *Anadara granosa*, Heavy Metal, Risk, Non-carcinogenic, Carcinogenic

PENDAHULUAN

Kabupaten Penajam Paser Utara (PPU) merupakan salah satu Kabupaten di Kalimantan Timur yang memiliki sumber daya laut dan merupakan salah satu penyumbang sumber daya laut bagi Provinsi Kalimantan Timur. Salah satu komoditas hasil laut dari Penajam Paser Utara khususnya di desa Babulu Laut adalah kerang darah (*Anadara granosa*) dengan angka produksi pada tahun 2023 hingga 1,5 ton (Izak dan Zakaria, 2023). Kerang *A. granosa* dikenal sebagai sumber nutrisi penting bagi tubuh manusia karena mengandung air (70-80%) dan protein (10-12%) sebagai penyusun utama, dengan kontribusi minor dari abu (2%), lemak (1%), serta karbohidrat yang berkisar 0,14% hingga 0,15% (Permata *et al.*, 2023). Namun demikian, dibalik manfaatnya sebagai sumber pangan, *A. granosa* juga memiliki kemampuan untuk mengakumulasi polutan, termasuk logam berat, dari lingkungan sekitarnya. Kemampuan ini menjadikannya sebagai bioindikator yang baik karena sifatnya yang sensitif terhadap perubahan kualitas habitat (Satriawan *et al.*, 2021; Ikhsan *et al.*, 2025). Kerang darah umumnya hidup di daerah intertidal berlumpur yang merupakan habitat yang umum ditemukan di wilayah pesisir Asia Tenggara. Sifatnya sebagai organisme filter feeder menyebabkan kerang ini tidak hanya rentan terhadap akumulasi polutan seperti mikroplastik, tetapi juga terhadap berbagai jenis logam berat (Indriyarsi *et al.*, 2026). Hal ini mengindikasikan bahwa kualitas lingkungan habitat *A. granosa* sangat dipengaruhi oleh masukan polutan dari berbagai aktivitas antropogenik di wilayah pesisir.

Pencemaran logam berat di perairan merupakan isu lingkungan yang krusial karena berpotensi menimbulkan risiko kesehatan yang serius (Hasibuan *et al.*, 2020). Di perairan PPU, keberadaan logam berat dapat disebabkan oleh faktor alamiah maupun aktivitas manusia. Berbagai kegiatan antropogenik seperti operasi industri, aktivitas pertanian, perikanan,

pembangunan perkotaan, serta aktivitas pelabuhan (Tarigan *et al.*, 2017; Suyatna *et al.*, 2019; Mufidah *et al.*, 2025) diduga berkontribusi terhadap masuknya logam seperti arsenik (As), besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), dan tembaga (Cu) ke dalam ekosistem perairan. Logam-logam yang telah masuk ke badan air bersifat persisten dan sulit terdegradasi, sehingga dapat bertahan dalam kurun waktu yang lama. Logam tersebut selanjutnya dapat terdistribusi oleh arus, terperangkap dalam sedimen, atau terakumulasi dalam tubuh biota perairan. Di kawasan pemukiman dan industri, konsentrasi logam berat kerap kali melebihi ambang batas aman, sehingga menimbulkan risiko ekologis dan mengancam kesehatan manusia. Ancaman ini muncul karena sifat logam yang toksik, kemampuan berbioakumulasi dalam rantai makanan, serta potensi karsinogeniknya (Dar *et al.*, 2025).

Mengingat *A. granosa* memiliki kemampuan *filter feeder* yang dapat mengakumulasi logam berat, kerang ini sangat berisiko terpapar kontaminan tersebut. Konsumsi kerang yang terkontaminasi secara terus-menerus oleh manusia berpotensi menimbulkan dampak kesehatan, terutama jika konsentrasi logam telah melampaui ambang batas yang ditetapkan. Dampak yang dapat ditimbulkan antara lain stres oksidatif, gangguan fungsi mitokondria, kerusakan protein dan struktur DNA, gangguan pada sistem neurologis, kardiovaskular, dan reproduksi (Kotnala *et al.*, 2025). Oleh karena itu, kajian penilaian risiko kesehatan manusia menjadi penting untuk dilakukan guna mengestimasi potensi bahaya di masa mendatang.

Sejumlah penelitian mengenai kontaminasi logam berat di perairan sekitar PPU sebenarnya telah dilakukan, misalnya deteksi logam Pb, Cd, Cu, dan As pada sampel air, sedimen, dan bivalva di Teluk Balikpapan (Sitorus *et al.*, 2020; Mufidah *et al.*, 2025). Kendati demikian, lokasi-lokasi penelitian tersebut masih berada di wilayah yang berdekatan dengan PPU, dan secara spesifik,

investigasi mengenai akumulasi logam As, Cu, Fe, Mn, dan Zn pada jaringan lunak *A. granosa* yang berasal dari perairan PPU sendiri masih sangat terbatas. Karenanya, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan konsentrasi As, Cu, Fe, Mn dan Zn pada jaringan lunak kerang *A. granosa* dari perairan Penajam Paser Utara serta menilai potensi risiko kesehatan yang mungkin timbul apabila kerang tersebut dikonsumsi manusia.

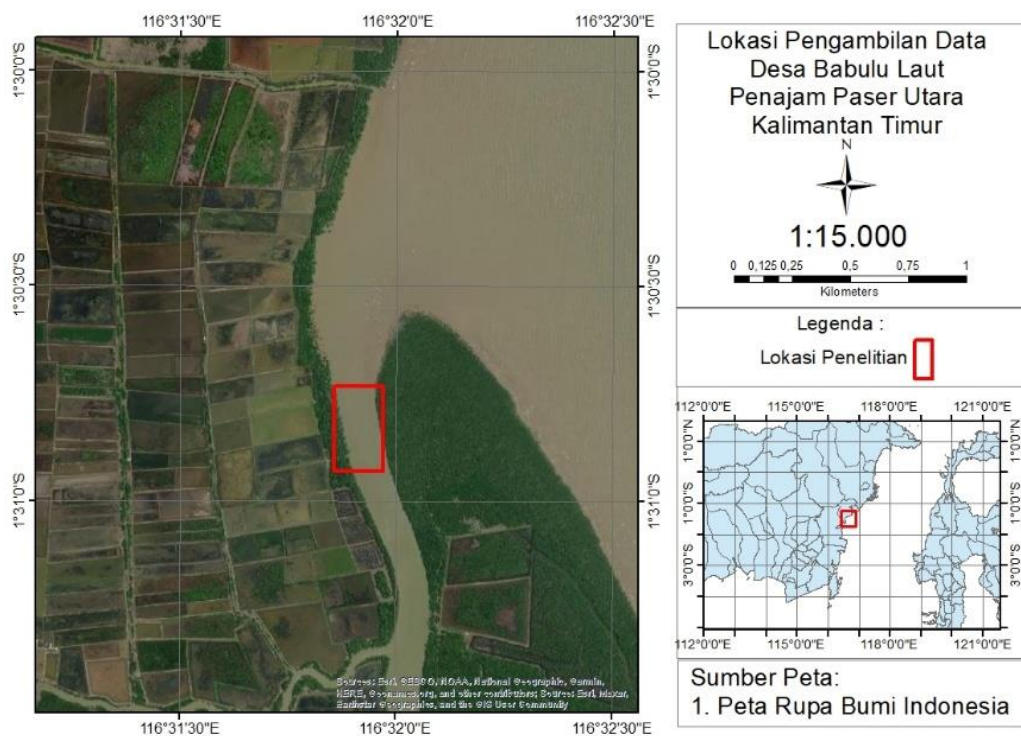
MATERI DAN METODE

Materi yang digunakan pada penelitian ini adalah sampel kerang *A. granosa* yang didapatkan dari nelayan Desa Babulu Laut, Kabupaten Penajam Paser Utara, Kalimantan Timur (Gambar 1). Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2024 hingga bulan April 2025. Lokasi penelitian tersebut diambil berdasarkan aktivitas tangkapan nelayan serta potensi area yang tercemar logam berat di perairan Penajam Paser Utara berdasarkan aktivitas manusia, industri dan pelabuhan. Proses preparasi sampel kerang dilakukan di Laboratorium Terpadu *Integrated Laboratory*, sedangkan proses destruksi dan analisis sampel dilakukan di laboratorium Kualitas Air, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Mulawarman.

Pengambilan Sampel *A. granosa*

Metode yang dilakukan di penelitian ini menggunakan metode survei. Sedangkan teknik sampling pengambilan sampel *A. granosa* dilakukan dengan metode *purposive sampling*. Menurut Sugiyono (2019), metode *purposive sampling* menekankan pengambilan data dengan berdasarkan tujuan tertentu dari peneliti. Pengambilan sampel berjarak 1 km dari rumah nelayan dan membutuhkan jarak sekitar 15 menit. Lokasi tersebut dipilih berdasarkan dugaan masukan logam berat dari aktivitas manusia serta kemudahan akses dari pengambilan sampel kerang di lokasi penelitian.

Terdapat 45 sampel kerang *A. granosa* yang ditangkap selama penelitian dengan cara diambil menggunakan tangan (*by hand*) dan dikumpulkan oleh nelayan lokal. Selanjutnya sampel kerang disimpan ke dalam *coolbox* dan selanjutnya dibawa ke *Integrated Laboratory* Universitas Mulawarman untuk penanganan lebih lanjut. Selanjutnya sampel kerang dilakukan pembersihan menggunakan air suling (akuades) dari sisa substrat. Pengukuran morfometri dan dilakukan pemisahan jaringan lunak dari cangkang dan kemudian dimasukkan ke dalam *ziplock* yang telah diberi nama sampel sebelumnya.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Ekstraksi Sampel *A. granosa*

Metode ekstraksi sampel *A. granosa* pada penelitian ini menggunakan metode destruksi kering. Sampel dibersihkan terlebih dahulu menggunakan akuades, kemudian sampel ditimbang beratnya dan dimasukkan ke dalam *aluminium foil* yang telah diberikan kode sebelumnya. Sampel kemudian dikeringkan menggunakan oven dengan suhu 85-90 °C selama kurang lebih 3×24 jam. Setelah itu, sampel dihomogenkan menggunakan mortar dan alu hingga halus.

Metode destruksi asam pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Universitas Mulawarman dengan berpedoman pada penelitian yang telah dilakukan Hastuti dan Atifah (2024) tentang destruksi yang dilakukan untuk pengujian logam berat. Sampel kerang ditimbang sebanyak kurang lebih 1 gr, lalu sampel dimasukkan ke dalam cawan porselen yang ditandai sebelumnya. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* selama kurang lebih 18 jam dengan suhu 450 °C. Masing-masing sampel kemudian ditambah dengan larutan asam nitrat (HNO₃) 65 % sebanyak 1 ml dan dipanaskan di *hotplate* hingga kering. Sampel lalu dimasukkan kembali ke dalam *furnace* pada suhu 450°C selama kurang lebih 5 jam. Setelahnya, larutan asam klorida (HCl) 6 N sebanyak 5 ml ditambahkan dan dipanaskan hingga kering, kemudian ditambahkan 10 ml HNO₃ 0,1 M serta 1 ml larutan *Ammonium Dihydrogen Phosphate* (NH₄H₂PO₄). Selanjutnya sampel dipindahkan ke labu ukur 50 ml dan diencerkan hingga tanda batas HNO₃ 0,1 M. Sampel yang telah diencerkan, kemudian disaring menggunakan kertas *Whatman* No 41, dan disimpan ke dalam botol kaca gelap yang telah diberikan nama. Analisis kandungan logam berat pada penelitian ini menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) tipe iCE 3000 dengan panjang gelombang 217 nm. Konsentrasi masing – masing logam di penelitian ini ditampilkan dalam mg/kg berat kering (*dry weight*).

Analisis Risiko Kesehatan

Kerang *A. granosa* yang telah diketahui kandungan logam berat sebelumnya kemudian dapat dilakukan analisis risiko kesehatan (*risk assessment*). Analisis risiko kesehatan dilakukan dengan menghitung nilai *Estimated Daily Intake* (EDI) dan *Target Hazard Quotient* (THQ) untuk menilai risiko non-karsinogenik akibat paparan logam berat melalui konsumsi kerang.

Estimated Daily Intake atau Nilai Asupan Harian (EDI) merupakan estimasi asupan harian. Perhitungan EDI dilakukan menggunakan persamaan:

$$EDI = \frac{(C \times IR)}{(BW)}$$

Dimana, C merupakan konsentrasi logam berat (As, Cu, Fe, Mn, dan Zn) dalam jaringan lunak sampel kerang *A. granosa* (mg/kg), IR adalah tingkat konsumsi ikan di Kalimantan Timur (0,13 kg/orang/hari), BW adalah berat badan rata-rata anak – anak (10 tahun) 23.3 kg, remaja (17 tahun) 49 kg, dan dewasa (18 tahun keatas) 60 kg. (USEPA, 2011; USEPA, 2023).

Tolerable hazard quotient (THQ) digunakan untuk menilai risiko kesehatan non-karsinogenik akibat mengonsumsi kerang yang mengandung logam berat. Nilai THQ dihitung dengan membandingkan nilai EDI terhadap *Reference Dose* (RfD) masing-masing logam berat menggunakan persamaan:

$$THQ = \frac{(C \times IR \times EF \times ED)}{(BW \times AT \times RfD)} \times 10^{-3}$$

Dimana, EF adalah frekuensi paparan logam berat (365 hari/tahun), ED adalah rata-rata durasi paparan (74,79 tahun), RfD adalah dosis referensi logam berat (As = 0,0003; Cu = 0,04; Fe = 0,57; Mn = 0,14; Zn = 0,3 mg/kg/hari), dan AT adalah waktu rata-rata paparan (365 hari/tahun x 73,1 tahun). Nilai THQ < 1 menunjukkan risiko kesehatan yang tidak signifikan, sedangkan THQ ≥ 1 menunjukkan potensi risiko kesehatan (USEPA, 2011).

Setelah mendapatkan nilai THQ, kemudian nilai *hazard index* (HI) bisa ditentukan dengan menjumlahkan nilai THQ masing-masing logam As, Cu, Fe, Mn, dan Zn. Berikut rumus yang dipakai untuk menentukan nilai HI:

$$HI = \sum_{i=1}^n THQ_n$$

Dimana, HI adalah nilai hazard indeks. THQ_n adalah nilai *target hazard quotient* masing – masing logam (As, Cu, Fe, Mn dan Zn). Nilai HI < 1 menunjukkan risiko kumulatif yang masih dapat

diterima oleh tubuh manusia (non-karsinogenik). Sebaliknya, apabila nilai $HI \geq 1$ akan berpotensi menimbulkan risiko kesehatan (FAO/WHO, 2011).

Efek Karsinogenik

Perhitungan efek karsinogenik (RK) dilakukan untuk menilai suatu paparan logam berat berpotensi untuk menimbulkan efek kanker yang besar atau kecil atau tidak berpotensi menimbulkan efek kanker sama sekali. Adapun untuk menghitung risiko kanker (RK) adalah dengan dikalikan dengan *Slope factor* dari logam arsen (As). Rumus untuk menghitung efek karsinogenik adalah sebagai berikut:

$$RK = EDI \times Sf$$

Dimana, RK adalah efek karsinogenik. EDI adalah nilai asupan harian (mg/kg/hari), dan Sf adalah nilai slope factor dari As (= 1,5 mg/kg/hari) berdasarkan Wahyuni & Kembaren, (2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsentrasi logam berat As, Cu, Fe, Mn, dan Zn yang terkandung pada jaringan lunak *A. granosa* pada penelitian kali ini dapat dilihat pada tabel 1. Ditemukan bahwa konsentrasi logam As berada di rentang 0,003-0,973 mg/kg dengan rata-rata $0,350 \pm 0,303$ mg/kg. Secara keseluruhan, konsentrasi As pada *A. granosa* di penelitian ini berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan oleh BPOM (2009) untuk moluska, yaitu sebesar 1,00 mg/kg. Konsentrasi Cu pada kerang di penelitian ini berada di rentang 0,064-0,133 mg/kg dengan rata-rata $0,103 \pm 0,035$ mg/kg. Konsentrasi tersebut secara keseluruhan masih dibawah ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh BPOM (2009) untuk Cu yang terkandung dalam moluska sebesar 20 mg/kg. Konsentrasi Fe pada penelitian kali ini berada di antara 2,357-4,519 mg/kg dengan rata-rata $3,197 \pm 0,628$ mg/kg. Konsentrasi Fe pada *A. granosa* pada penelitian ini telah melampaui baku mutu yang telah ditetapkan oleh BPOM (2009) dan CCFAC (2011) yaitu sebesar 1,00 mg/kg dan 0,80 mg/kg. Konsentrasi Mn di penelitian ini berada di rentang 0,102-0,205 mg/kg dengan rata-rata $0,156 \pm 0,038$ mg/kg. Nilai tersebut masih dibawah standar baku mutu yang ditetapkan Turkish Guidline (2007) yaitu sebesar 20 mg/kg. Kandungan Zn pada penelitian ini berada pada angka 0,736-0,991 mg/kg dengan rata-rata $0,846 \pm 0,071$ mg/kg. Kandungan logam ini

masih dibawah standar baku mutu yang telah ditetapkan oleh BPOM (2009) yaitu sebesar 100 mg.

Perbandingan konsentrasi beberapa logam pada jaringan lunak *A. granosa* di penelitian ini dapat dilihat pada tabel 1. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa kandungan logam pada jaringan lunak *A. granosa* bervariasi. Berdasarkan data logam berat yang didapat, kandungan logam pada *A. granosa* rata-rata masih dibawah baku mutu yang telah ditentukan dari beberapa referensi untuk keperluan pangan (As, Cu, Mn, Zn) dan terdapat logam Fe yang melebihi baku mutu yang telah ditetapkan. Logam berat yang melebihi ambang batas baku mutu dapat berpotensi menimbulkan risiko kesehatan pada manusia apabila dikonsumsi dalam jumlah berlebih (Agristiyani *et al.*, 2022).

Secara umum, urutan konsentrasi logam dari yang tertinggi hingga terendah dalam penelitian ini adalah $Fe > Zn > As > Mn > Cu$. Dominasi logam Fe diduga berkaitan erat dengan berbagai aktivitas antropogenik di sekitar lokasi sampling. Aktivitas tersebut mencakup konversi lahan mangrove menjadi kawasan pertambakan dan pertanian, serta operasional kawasan industri, pelabuhan, dan galangan kapal di sekitar Teluk Balikpapan. Logam Fe yang masuk ke badan air dapat larut ke dalam kolom perairan dan selanjutnya terdistribusi ke wilayah pesisir Balikpapan dan Penajam Paser Utara (PPU) melalui proses hidro-oseanografi, meliputi arus, gelombang, dan pasang surut (Liu *et al.*, 2023). Distribusi ini pada akhirnya menyebabkan akumulasi logam Fe pada sedimen yang berperan sebagai sink (penampung). Akumulasi logam dalam sedimen tersebut merupakan salah satu faktor utama yang berkontribusi terhadap peningkatan kandungan logam pada kerang yang hidup di perairan tersebut.

Pada dasarnya Fe adalah logam esensial yang dibutuhkan kerang untuk aktifitas fisiologis dan metabolisme tubuh *A. granosa*. Logam Fe dibutuhkan *A. granosa* sebagai komponen enzim yang digunakan sel darah merah untuk transport oksigen ke seluruh jaringan tubuh berdasarkan hasil investigasi Murraya *et al* (2018). Sementara logam Zn diperlukan *A. granosa* untuk pertumbuhan, reproduksi, fungsi kekebalan tubuh, dan pertahanan antioksidan. Sementara itu, logam As tidak dibutuhkan oleh kerang karena merupakan logam non esensial sehingga tidak ada fungsi metabolik. Arsen (terutama anorganik) bersifat toksik bagi kerang karena dapat mengganggu enzim, menyebabkan stres oksidatif,

dan menghambat pertumbuhan. Logam Mn juga dibutuhkan oleh *A. granosa* sebagai aktivator enzim untuk metabolisme protein dan karbohidrat dan pembentukan cangkang dan struktur rangka. Kemudian, logam Cu dibutuhkan kerang *A. granosa* sebagai komponen utama pigmen hemocyanin (pengganti hemoglobin) yang mengikat oksigen dalam hemolimfa (darah) serta sebagai kofaktor enzim antioksidan. Pada umumnya, apabila logam berat tersebut tidak melampaui baku mutu, maka akan cenderung aman apabila dikonsumsi manusia, namun kelebihan logam berat tersebut akan menyebabkan toksisitas pada manusia apabila mengonsumsinya (Cardoso, 2025).

Analisis Risiko Kesehatan

Nilai asupan harian (EDI) dapat dilihat pada tabel 2. Nilai asupan harian dihitung berdasarkan berat badan orang dewasa, remaja dan anak-anak untuk melihat seberapa besar asupan logam berat yang masuk ke tubuh manusia setiap harinya. Nilai asupan harian kemudian dibandingkan dengan PMTDI atau nilai dosis referensi harian yang dianjurkan untuk logam berat bisa terpapar oleh manusia. Pada logam berat As, nilai EDI untuk orang dewasa adalah $7,58 \times 10^{-4}$, remaja ($9,29 \times 10^{-4}$), dan anak - anak ($1,95 \times 10^{-3}$) mg/kg/hari. Nilai EDI pada seluruh kelompok umur berada di atas nilai RfD (3×10^{-4} mg/kg/hari), terutama pada anak-

anak dengan nilai $1,95 \times 10^{-3}$ mg/kg/hari. Hal ini mengindikasikan adanya potensi risiko kesehatan non-karsinogenik atau karsinogenik akibat paparan As, khususnya pada kelompok anak-anak. Arsen dikenal sebagai logam beracun yang dapat memengaruhi sistem saraf, pencernaan, dan metabolisme jika terpapar dalam jangka panjang.

Logam Cu dari dewasa adalah $2,22 \times 10^{-4}$, remaja ($2,72 \times 10^{-4}$) hingga anak-anak ($5,72 \times 10^{-4}$) mg/kg/hari, Nilai EDI untuk Cu pada seluruh kelompok umur masih jauh di bawah nilai RfD (4×10^{-2} mg/kg/hari), sehingga dapat dikatakan bahwa paparan Cu melalui konsumsi pangan perikanan pada penelitian ini masih berada dalam batas aman. Tembaga merupakan unsur esensial yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah kecil, namun tetap dapat bersifat toksik apabila terakumulasi melebihi ambang batas berdasarkan Taylor *et al.*, (2023). Logam Fe nilai EDI dari dewasa hingga anak-anak adalah $6,93 \times 10^{-3}$, $8,48 \times 10^{-3}$ dan $1,78 \times 10^{-2}$ mg/kg/hari dengan nilai RfD Fe adalah $5,7 \times 10^{-1}$ mg/kg/hari. Nilai tersebut menjadikan logam Fe memiliki nilai EDI yang tertinggi dibandingkan nilai EDI logam yang lain. Namun begitu, nilai EDI pada logam Fe masih dibawah nilai RfD sehingga belum menimbulkan potensi risiko kesehatan. Besi merupakan unsur esensial yang berperan penting dalam pembentukan hemoglobin dan proses metabolisme tubuh (Yona *et al.*, 2020).

Tabel 1. Perbandingan Logam Berat Kerang *A. granosa* (mg/kg) berat kering

Kode	As	Cu	Fe	Mn	Zn
Kerang 1	0,391	0,133	3,21	0,205	0,991
Kerang 2	0,591	0,064	3,48	0,140	0,821
Kerang 3	0,009	0,131	4,52	0,203	0,888
Kerang 4	0,392	0,066	2,50	0,123	0,817
Kerang 5	0,196	0,133	2,88	0,123	0,790
Kerang 6	0,394	0,066	3,35	0,183	0,847
Kerang 7	0,199	0,132	2,36	0,102	0,736
Kerang 8	0,973	0,066	3,27	0,182	0,871
Kerang 9	0,003	0,132	3,21	0,143	0,853
Min	0,003	0,064	2,357	0,102	0,736
Max	0,973	0,133	4,519	0,205	0,991
Rata - rata	0,350	0,103	3,197	0,156	0,846
Standar deviasi	0,303	0,035	0,628	0,038	0,071
BPOM (2009)	1,00	20	1,00	-	100
CCFAC (2011)	-	-	0,80	-	-
Turkish Guidline (2007)	-	-	-	20	-

Logam Mn asupan harian dari dewasa ($3,38 \times 10^{-4}$), remaja ($4,14 \times 10^{-4}$) hingga anak-anak ($8,70 \times 10^{-4}$) mg/kg/hari dengan nilai RfD logam Mn adalah $1,4 \times 10^{-1}$ mg/kg/hari. Secara umum, nilai EDI pada logam Mn di semua kelompok umur juga masih berada di bawah nilai RfD. Namun demikian, kelompok anak-anak tetap menunjukkan nilai EDI tertinggi. Karenanya, kelompok ini perlu mendapatkan perhatian khusus mengingat paparan Mn dalam jangka panjang dapat berdampak pada sistem saraf pusat. Nilai asupan harian logam Zn dari dewasa ($1,83 \times 10^{-3}$), remaja ($2,24 \times 10^{-3}$), dan anak-anak ($4,72 \times 10^{-3}$) mg/kg/hari dengan nilai RfD 3×10^{-1} mg/kg/hari. Secara umum, nilai EDI Zn pada seluruh kelompok umur masih berada jauh di bawah nilai RfD. Seng merupakan logam esensial yang berperan dalam sistem imun dan pertumbuhan, sehingga pada konsentrasi yang terukur dalam penelitian ini belum menunjukkan potensi risiko kesehatan (Soegianto *et al.*, 2020).

Secara keseluruhan, nilai EDI untuk seluruh logam berat menunjukkan pola yang konsisten, yang mana kelompok anak-anak memiliki nilai EDI tertinggi, diikuti oleh remaja dan dewasa. Hal ini berkaitan dengan perbedaan berat badan, tingkat konsumsi relatif, serta kerentanan fisiologis anak-anak terhadap paparan logam berat. Kondisi ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Saputra *et al.*, (2025) yang menyatakan bahwa kelompok usia anak-anak cenderung menerima dosis paparan lebih besar per satuan berat badan dibandingkan kelompok usia lainnya.

Risiko Non Karsinogenik

Tabel 3 menyajikan nilai *Total Hazard Quotient* (THQ) untuk logam berat As, Cu, Fe, Mn, dan Zn pada kelompok dewasa, remaja, dan anak-anak, serta nilai *Hazard Index* (HI) sebagai akumulasi risiko paparan non-karsinogenik dari seluruh logam yang dianalisis. Nilai THQ digunakan untuk mengevaluasi potensi risiko kesehatan dengan kriteria $THQ < 1$ menunjukkan tidak adanya risiko non-karsinogenik yang signifikan, sedangkan $THQ \geq 1$ mengindikasikan potensi risiko Kesehatan (Bruno *et al.*, 2024).

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai THQ seluruh logam berat pada ketiga kelompok umur berada jauh di bawah nilai ambang batas ($THQ < 1$). Hal ini menunjukkan bahwa paparan logam berat melalui konsumsi pangan perikanan pada perairan Babulu Laut masih berada dalam batas aman dan tidak berpotensi menimbulkan dampak

kesehatan non-karsinogenik secara langsung. Di antara logam yang dianalisis, arsen (As) memiliki nilai THQ tertinggi pada seluruh kelompok umur, dengan nilai sebesar $2,53 \times 10^{-3}$ pada dewasa, $3,10 \times 10^{-3}$ pada remaja, dan $6,51 \times 10^{-3}$ pada anak-anak. Nilai THQ logam berat As yang lebih tinggi dibandingkan logam lainnya menunjukkan bahwa arsen merupakan kontributor utama terhadap risiko non-karsinogenik, meskipun nilainya masih jauh di bawah batas aman. Pola ini konsisten dengan hasil EDI sebelumnya yang menunjukkan bahwa arsen memiliki tingkat paparan relatif lebih tinggi dibandingkan logam berat lainnya.

Logam tembaga (Cu), besi (Fe), mangan (Mn), dan seng (Zn) menunjukkan nilai THQ yang sangat rendah pada seluruh kelompok umur, berkisar antara 10^{-6} hingga 10^{-5} . Rendahnya nilai THQ pada logam-logam tersebut mengindikasikan bahwa kontribusi masing-masing logam terhadap risiko kesehatan non-karsinogenik relatif kecil. Selain itu, Cu, Fe, Mn, dan Zn merupakan unsur esensial yang dibutuhkan tubuh dalam jumlah tertentu, sehingga pada konsentrasi yang terukur dalam penelitian ini belum menimbulkan efek toksik (Otchere, 2022).

Kelompok anak-anak secara konsisten menunjukkan nilai THQ yang lebih tinggi dibandingkan kelompok dewasa dan remaja untuk seluruh logam berat. Kondisi ini berkaitan dengan perbedaan berat badan dan tingkat konsumsi relatif yang lebih tinggi per satuan berat badan, sehingga meningkatkan dosis paparan yang diterima. Meskipun demikian, seluruh nilai THQ pada kelompok anak-anak tetap berada di bawah ambang batas aman.

Nilai *Hazard Index* (HI) yang diperoleh pada penelitian ini masing-masing sebesar $2,55 \times 10^{-3}$ untuk dewasa, $3,13 \times 10^{-3}$ untuk remaja, dan $6,58 \times 10^{-3}$ untuk anak-anak. Seluruh nilai $HI < 1$, yang menunjukkan bahwa paparan gabungan dari seluruh logam berat yang dianalisis tidak menimbulkan risiko kesehatan non-karsinogenik bagi masyarakat pada ketiga kelompok umur. Namun demikian, nilai HI tertinggi pada kelompok anak-anak menegaskan bahwa kelompok ini merupakan populasi yang paling rentan terhadap paparan logam berat (Idris *et al.*, 2023).

Secara keseluruhan, hasil analisis THQ dan HI menunjukkan bahwa konsumsi pangan perikanan dari perairan Babulu Laut masih tergolong aman bagi kesehatan manusia. Meskipun demikian, keberadaan arsen sebagai logam dengan

kontribusi risiko tertinggi menegaskan pentingnya pemantauan berkala terhadap kandungan logam berat, khususnya arsen, guna meminimalkan potensi risiko kesehatan jangka panjang, terutama pada kelompok usia anak-anak.

Risiko Karsinogenik

Berdasarkan status biologis dan potensi karsinogeniknya, kelima logam yang dianalisis diklasifikasikan sebagai berikut: (1) Arsen (As) merupakan logam non-esensial dan karsinogenik (IARC Group 1), sehingga dilakukan analisis risiko karsinogenik dan non-karsinogenik secara lengkap; (2) Tembaga (Cu), Besi (Fe), Mangan (Mn), dan Seng (Zn) merupakan logam esensial dan tidak diklasifikasikan sebagai karsinogen (IARC Group 3). Oleh karena itu, untuk keempat logam esensial ini, analisis risiko hanya difokuskan pada risiko non-karsinogenik akibat kelebihan paparan kronis. Pendekatan ini sesuai dengan

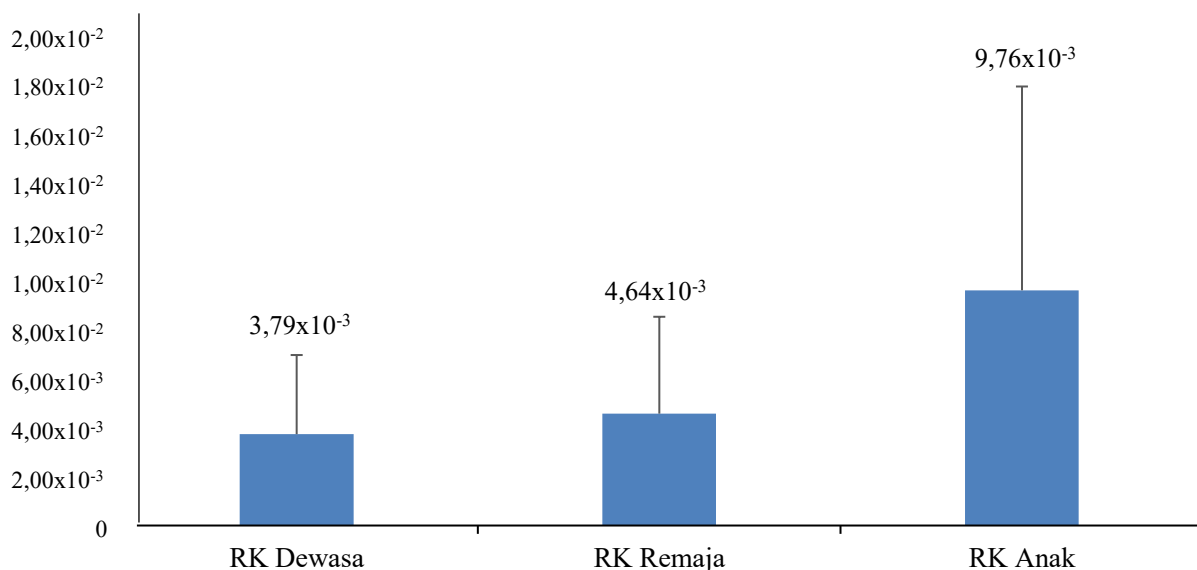
pedoman USEPA (2011) dan WHO (2019), yang mana zat non-karsinogenik digunakan perhitungan Hazard Quotient (HQ) berdasarkan *Reference Dose* (RfD) atau nilai ambang batas sejenis.

Grafik nilai risiko kanker dapat dilihat pada gambar 2. Grafik tersebut menunjukkan nilai *Cancer Risk* (CR) akibat paparan logam arsen (As) melalui konsumsi kerang *A. granosa* pada tiga kelompok umur, yaitu dewasa, remaja, dan anak-anak. Risiko karsinogenik dihitung untuk mengestimasi probabilitas terjadinya kanker selama masa hidup akibat paparan arsen secara kronis.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai CR arsen pada kelompok dewasa sebesar $3,79 \times 10^{-3}$, kelompok remaja sebesar $4,64 \times 10^{-3}$, dan kelompok anak-anak mencapai $9,76 \times 10^{-3}$. Nilai-nilai tersebut berada di atas batas risiko yang dapat diterima menurut *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2023), yaitu 1×10^{-4} hingga 1×10^{-6}

Tabel 2. Nilai Asupan Harian (mg/kg/hari)

Logam Berat	Dewasa	Remaja	Anak-anak	RfD
As	$7,58 \times 10^{-4}$	$9,29 \times 10^{-4}$	$1,95 \times 10^{-3}$	3×10^{-4}
Cu	$2,22 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$	$5,72 \times 10^{-4}$	4×10^{-2}
Fe	$6,93 \times 10^{-3}$	$8,48 \times 10^{-3}$	$1,78 \times 10^{-2}$	$5,7 \times 10^{-1}$
Mn	$3,38 \times 10^{-4}$	$4,14 \times 10^{-4}$	$8,70 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-1}$
Zn	$1,83 \times 10^{-3}$	$2,24 \times 10^{-3}$	$4,72 \times 10^{-3}$	3×10^{-1}



Gambar 2. Nilai Risiko Kanker Akibat Paparan Logam Arsen (As) pada Konsumen Dewasa, Remaja dan Anak-anak (rata – rata ± standard deviasi).

Tabel 3. Nilai THQ dan HI

Logam Berat	THQ		
	Dewasa	Remaja	Anak-anak
As	$2,53 \times 10^{-3}$	$3,10 \times 10^{-3}$	$6,51 \times 10^{-3}$
Cu	$5,55 \times 10^{-6}$	$6,80 \times 10^{-6}$	$1,43 \times 10^{-5}$
Fe	$1,22 \times 10^{-5}$	$1,49 \times 10^{-5}$	$3,13 \times 10^{-5}$
Mn	$2,41 \times 10^{-6}$	$2,96 \times 10^{-6}$	$6,22 \times 10^{-6}$
Zn	$6,11 \times 10^{-6}$	$7,48 \times 10^{-6}$	$1,57 \times 10^{-5}$
HI	$2,55 \times 10^{-3}$	$3,13 \times 10^{-3}$	$6,58 \times 10^{-3}$

untuk klasifikasi sedang dan masuk ke kategori tinggi yaitu $\geq 1 \times 10^{-3}$. Kondisi ini mengindikasikan bahwa paparan arsen melalui konsumsi *A granosa* berpotensi menimbulkan risiko karsinogenik bagi seluruh kelompok umur.

Kelompok anak-anak menunjukkan nilai CR tertinggi dibandingkan kelompok remaja dan dewasa. Hal ini berkaitan dengan faktor berat badan yang lebih rendah serta dosis paparan yang relatif lebih besar per satuan berat badan, sehingga meningkatkan risiko karsinogenik yang diterima. Tingginya nilai CR pada anak-anak menegaskan bahwa kelompok ini merupakan populasi paling rentan terhadap dampak kesehatan jangka panjang akibat paparan arsen.

Arsen dikenal sebagai logam berat bersifat karsinogenik yang dapat meningkatkan risiko kanker kulit, paru-paru, hati, dan kandung kemih apabila terpapar dalam jangka panjang berdasarkan hasil investigasi Vernanda *et al.*, (2024). Meskipun hasil analisis THQ dan HI sebelumnya menunjukkan tidak adanya risiko non-karsinogenik yang signifikan, tingginya nilai CR arsen menegaskan bahwa evaluasi risiko karsinogenik memberikan perspektif yang berbeda dan lebih sensitif terhadap dampak paparan jangka panjang. Dengan demikian, konsumsi kerang *A granosa* dari perairan Babulu Laut, Penajam Paser Utara berpotensi menimbulkan risiko kanker, khususnya pada kelompok anak-anak, apabila dikonsumsi secara terus-menerus dalam jangka panjang. Temuan ini menegaskan pentingnya dilakukan strategi pengelolaan risiko dengan cara pengendalian pencemaran logam arsen di perairan, pemantauan berkala kandungan logam berat pada biota perairan, serta pemberian informasi kepada masyarakat mengenai pola konsumsi yang aman untuk meminimalkan risiko kesehatan.

Berdasarkan hasil analisis risiko non-karsinogenik dan karsinogenik, khususnya

tingginya nilai *Cancer Risk* arsen (As), diperlukan upaya pengelolaan terpadu yang melibatkan dinas terkait, lembaga non-pemerintah (NGO), dan pemerhati lingkungan. Dinas yang membidangi lingkungan hidup, perikanan, dan kesehatan perlu melakukan pemantauan rutin kandungan logam berat di perairan pesisir dan biota perairan serta menyusun rekomendasi konsumsi aman, terutama bagi kelompok rentan seperti anak-anak. NGO diharapkan berperan dalam meningkatkan kesadaran masyarakat melalui edukasi mengenai risiko paparan logam berat dan pentingnya pola konsumsi pangan perikanan yang aman. Sementara itu, pemerhati lingkungan dan akademisi berperan dalam mendukung penelitian berkelanjutan terkait sumber pencemar arsen dan bioakumulasi pada *Anadara granosa*, sehingga dapat menjadi dasar dalam perumusan strategi pengelolaan lingkungan pesisir yang berkelanjutan dan berorientasi pada perlindungan kesehatan masyarakat.

KESIMPULAN

Kandungan logam berat As, Cu, Fe, Mn dan Zn pada jaringan lunak kerang *A. granosa* di perairan Babulu Laut Penajam Paser Utara pada penelitian kali ini telah ditemukan logam As, Cu, Mn dan Zn masih dibawah standar baku mutu yang telah ditentukan oleh berbagai referensi terkecuali pada logam Zn yang telah melampau baku mutu dari BPOM (2009). Nilai EDI masing-masing logam berat lebih rendah dari RfD, serta nilai masing-masing THQ dan HI dibawah 1 sehingga dapat diindikasikan tidak terdapat risiko penyakit non-karsinogenik apabila kerang *A. granosa* tersebut dikonsumsi. Penilaian risiko kanker (CR) menunjukkan bahwa konsumsi kerang *A. granosa* dari perairan Babulu Laut berpotensi menimbulkan penyakit karsinogenik ($3,79 \times 10^{-3}$ - $9,76 \times 10^{-3}$) sehingga perlu untuk dilakukan strategi dalam mengelola risiko kesehatan yang dilakukan oleh

stakeholder terkait. Strategi pengelolaan risiko perlu dirumuskan oleh pemangku kepentingan untuk memitigasi potensi bahaya karsinogenik akibat konsumsi *A. granosa* di perairan Babulu Laut, mengingat risiko non-karsinogeniknya masih tergolong aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Agriyanti, N., Suprijanto, J. & Ario, R. 2022. Asupan aman konsumsi logam Cu pada kerang darah dari Tempat Pelelangan Ikan Tambak Lorok, Semarang. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(1): 71–76. doi: 10.14710/buloma.v11i1.37143
- B POM. 2009. *Penetapan Batas Maksimum Cemaran Mikroba dan Kimia dalam Makanan*. Badan Pengawas Obat dan Makanan, HK.00.06.1.52.4011.
- Bruno, F., Nava, V., Zappalà, S., Costa, G.L., Fazio, F., Parrino, V. & Licata, P. 2024. Mineral composition in mussel *Mytilus galloprovincialis* and clam *Tapes decussatus* from Faro Lake of Messina: Risk assessment for human health. *Frontiers in Toxicology*, 6: 1494977. doi: 10.3389/ftox.2024.1494977
- Cardoso, H. 2025. Benefits of supplementation organically complexed trace minerals (Zn, Cu, Mn and Fe) in poultry and swine: A mini-review. *Research, Society and Development*, 14(9): 1–6. doi: 10.33448/rsd-v14i9.49508
- Dar, M.A., Fouad, R.R., Madkour, A.G., El Saharty, A.A. & Belal, A.A. 2025. Assessment of heavy metal accumulation and mineralization in edible bivalves and their health risks: A case study of Timsah Lake, Suez Canal, Egypt. *Water, Air, and Soil Pollution*, 236: 365. doi: 10.1007/s11270-025-07947-7
- FAO/WHO [Food and Agricultural Organization of the United Nations/World Health Organization]. 2011. *Joint FAO/WHO Food Standards Programme Codex Committee on Contaminants in Foods*. The Hague, The Netherlands.
- Hasibuan, Z.H., Yulianto, B. & Nuraini, R.A.T. 2020. Analisis timbal pada air, sedimen dan *Enhalus acoroides* Royle 1839 (Angiosperms: Hydrocharitaceae) di Perairan Jepara. *Journal of Marine Research*, 9(3): 230–236. doi: 10.14710/jmr.v9i3.27477
- Hastuti, E. & Alfifah, Y. 2024. Analisis kandungan logam berat timbal pada ikan bandeng yang dibudidayakan di tambak Kota Semarang. *JKM (Jurnal Kesehatan Masyarakat) Cendekia Utama*, 12(1): 42–53. doi: 10.31596/jkm.v12i1.1649
- Idris, N., Jamil, S., Zakaria, N., Tatazi, M., Halim, N., Nor, A. & Zulkifli, Z. 2023. Assessment of copper and zinc concentrations in *Anadara granosa*. *BIO Web of Conferences*. doi: 10.1051/bioconf/20237305008
- Indriyasari, K.N., Soegianto, A., Kuncoro, E.P., Afidah, P.N., Sari, A., Putranto, T.W.C. & Hartl, M.G. 2026. Contamination of microplastics and heavy metals in the antique ark *Anadara antiquata* (Linnaeus, 1758) from the East Java Coast of Indonesia: Bioaccumulation and potential health risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 224: 119147. doi: 10.1016/j.marpolbul.2025.119147
- Izak & Zakaria, I. 2023. Menilik potensi komoditas kerang darah di Penajam, bisa topang ekonomi nelayan, panen perdana 1,5 ton. *PROKAL.Co*. Diakses 23 September 2025.
- Kotnala, S., Tiwari, S., Nayak, A., Bhushan, B., Chandra, S., Medeiros, C.R. & Coutinho, H.D.M. 2025. Impact of heavy metal toxicity on the human health and environment. *Science of the Total Environment*, 987: 179785. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179785
- Liu, T., Zhu, L., Bao, R., Hu, R., Jiang, S., Zhu, Y. & Song, Y. 2023. Hydrodynamically-driven distribution and remobilization of heavy metals in surface sediments around the coastal area of Shandong Peninsula, China. *Science of the Total Environment*, 857: 159286. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159286
- Mufidah, F., Papatungan, M.S. & Ritonga, I.R. 2025. Cadmium (Cd) content in sediments along the Somber River, Balikpapan City, East Kalimantan. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(4b): 584–591. doi: 10.29303/jbt.v25i4b.10891
- Murraya, Taufiq-Spj, N. & Supriyanti, E. 2018. Kandungan logam berat besi (Fe) dalam air, sedimen dan kerang hijau (*Perna viridis*) di Perairan Trimulyo, Semarang. *Journal of Marine Research*, 7(2): 133–140.
- Otchere, F.A. 2022. Trace metal pollution in the environment: A comparison of the bio-indicator concept in three bivalves. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 14(1): 1–8. doi: 10.5897/JE CE2021.0480
- Permata, Y.M., Liesna, A.T., Rangkuti, F.M., Insyra, K. & Dayanti, Y. 2023. Proximate

- composition of *Anadara granosa* and *Paphia undulata*. *Indonesian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 6(1): 1–5. doi: 10.32734/idjpcr.v6i1.9196
- Saputra, M.I., Nurfadilah & Ritonga, I.R. 2025. Risk analysis of lead (Pb) in *Anadara granosa* from the waters of North Penajam Paser. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(4): 5580–5590. doi: 10.29303/jbt.v25i4.10295
- Satriawan, E.F., Widowati, I. & Suprijanto, J. 2021. Pencemaran logam berat kadmium (Cd) dalam kerang darah (*Anadara granosa*) yang didaratkan di Tambak Lorok Semarang. *Journal of Marine Research*, 10(3): 437–445. doi: 10.14710/jmr.v10i3.30155
- Sitorus, S., Ilang, Y. & Nugroho, R.A. 2020. Analisis kadar logam Pb, Cd, Cu, As pada air, sedimen dan bivalvia di Pesisir Teluk Balikpapan. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 7(2): 89–94. doi: 10.31258/dli.7.2.p.89-94
- Soegianto, A., Putranto, T., Lutfi, W., Almirani, F., Hidayat, A., Muhammad, A., Firdaus, R., Rahmadhani, Y., Fadila, D. & Hidayati, D. 2020. Concentrations of metals in tissues of cockle *Anadara granosa* (Linnaeus, 1758) from East Java Coast, Indonesia, and potential risks to human health. *International Journal of Food Science*, 5345162: 1–9. doi: 10.1155/2020/5345162
- Sugiyono. 2019. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif & RND*. Bandung: Alfabeta.
- Suyatna, I., Riadi, R.I., Feriyanto, I.J., Ghitarina, Gunawan, B.I., Sasono, R.R. & Rafii, A. 2019. Determination of water quality condition from water samples around location of ship to ship transfer of coal in Balikpapan, East Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 348(1): 012067.
- Tarigan, A.K., Samsura, D.A.A., Sagala, S. & Wimbardana, R. 2017. Balikpapan: Urban planning and development in anticipation of the post-oil industry era. *Cities*, 60: 246–259.
- Taylor, A.A., Tsuji, J.S., McArdle, M.E., Adams, W.J. & Goodfellow, W.L. 2023. Recommended reference values for risk assessment of oral exposure to copper. *Risk Analysis*, 43(2): 211–218. doi: 10.1111/risa.13906
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. 2011. *Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/600/R-09/052F. 1436 pp
- USEPA [United States Environmental Protection Agency]. 2023. *Regional Screening Levels (RSLs)-Generic Tables*. Diakses 27 September 2025.
- Vernanda, J.A., Zatri, Z.I., Hidayati, N.V., Fitriani, M., Manaf, L.B.A. & Andriyono, S. 2024. Study of heavy metals (Pb, Cd, As, Hg) content in blood clam (*Anadara granosa*) and undulate venus clam (*Paratapes undulata*) collected from Ujungpangkah Gresik, Indonesia. *Agricultural Product Health and Safety*, 55(1): 95–107. doi: 10.62321/issn.1000-1298.2024.01.08
- Wahyuni, S. & Kembaren, M.B.S. 2023. Analisis resiko kesehatan lingkungan dampak jangka panjang paparan arsen, timbal dan mangan di daerah zona merah Gunung Sinabung yang sudah ditempati kembali. *Best Journal: Biology Education Sciences & Technology*, 6(2): 822–828.
- Yona, D., Sari, S.H.J., Iranawati, F., Rayyan, M.F. & Rini, N.M. 2020. Heavy metals accumulation and risk assessment of *Anadara granosa* from eastern water of Java Sea, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 416: 012007. doi: 10.1088/1755-1315/416/1/012007